

AGA 0505 - Análise de Dados em Astronomia

4. Amostragem e Simulações

Laerte Sodré Jr.

1o. semestre, 2025

aula de hoje: o método de Monte Carlo

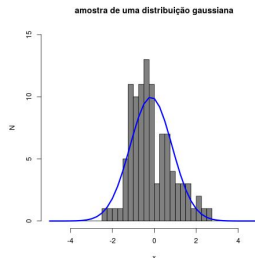
1. introdução: populações e amostras
2. o método de Monte Carlo
3. amostragem de distribuições de probabilidades
4. integração por Monte Carlo
5. simulação de Monte Carlo: esfera uniforme
6. MCMC- Markov Chain Monte Carlo

O registro de um mês de roleta em Monte Carlo nos dá material para discutir os fundamentos do conhecimento

Karl Pearson

variáveis aleatórias, população e amostragem

- variáveis aleatórias
 - variável (contínua ou discreta) cujos valores representam o resultado de fenômenos aleatórios
 - supõe-se que uma variável aleatória represente uma propriedade x de uma **população** e obedeça a uma distribuição de probabilidades $P(x)$
 - resultados de medidas ou observações podem ser tratados como variáveis aleatórias
- amostragem (*sampling*) de $P(x)$
 - de uma população, descrita por $P(x)$, podemos extrair uma **amostra** aleatória
 - a distribuição da amostra é denominada *distribuição amostral*
 - é importante distinguir as propriedades da população e da amostra!



propriedades da população e da amostra

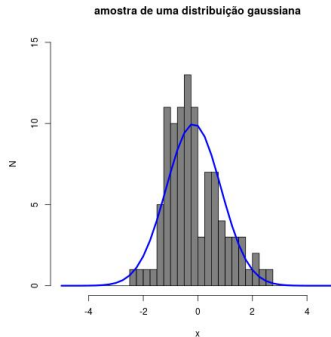
- média e desvio padrão da população e da amostra:
 - considere uma população descrita por uma variável x com distribuição normal, $N(\mu, \sigma)$
 - considere uma amostra de N objetos obtida a partir dessa distribuição
 - média $\bar{x}$ da amostra:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

- desvio padrão não viesado da amostra:

$$\sigma_s = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \right]^{1/2}$$

- μ, σ : parâmetros da população
- $\bar{x}, \sigma_s$: parâmetros da amostra

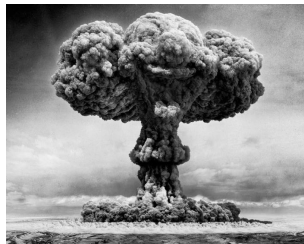


o método de Monte Carlo

- método de resolução de problemas baseado em amostragem aleatória de distribuições de probabilidades
- inventado por Stanislaw Ulam, John von Neuman e Nicholas Metropolis durante o projeto Manhattan
 - Ulam (um dos que desenharam a bomba de hidrogênio) bolou o método em 1946, pensando nas probabilidades de se ganhar um jogo de cartas de paciência
 - Metropolis é o responsável pelo nome Monte Carlo

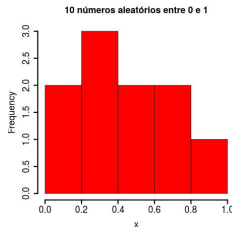
aplicações:

- amostragens de PDFs
- integração numérica
- otimização
- simulação de sistemas complexos
- ...



amostragem de distribuições de probabilidades

- objetivo da amostragem:
dada uma distribuição de probabilidades $P(x)$,
gerar N amostras $\{x_i\}$ distribuídas como $P(x)$
- exemplo: amostra de números aleatórios
uniformemente distribuídos entre 0 e 1



- note que números gerados pelos “geradores de números aleatórios” são muitas vezes *pseudo-aleatórios*
- é possível produzir números aleatórios por “hardware”:
ex.: um dado não viesado pode gerar números aleatórios inteiros entre 1 e 6

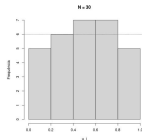


amostragem de distribuições de probabilidades por MC

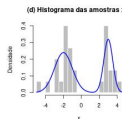
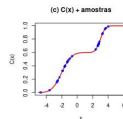
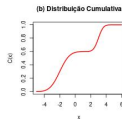
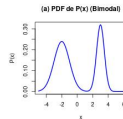
- *pode-se produzir amostras de qualquer distribuição de probabilidade usando apenas amostras de uma distribuição aleatória uniforme em $[0, 1]$*
- seja $P(x)$ uma distribuição de probabilidade e $C(x)$ sua distribuição cumulativa:

$$C(x) = \int_{-\infty}^x P(x)dx$$

- *pode-se mostrar que $C(x)$ tem uma distribuição uniforme!*



- receita para se obter uma amostra $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ de $P(x)$:
 - obtenha valores $\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ uniformemente distribuídos em $[0, 1]$
 - determine x_i resolvendo a equação $u_i = C(x_i)$



exemplo: distribuição exponencial

- produção de uma amostra $\{x_i\}$ com $P(x) = e^{-x}$ ($x > 0$)
- distribuição cumulativa:

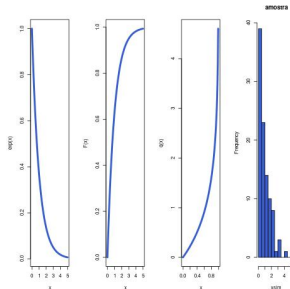
$$C(x) = \int_0^x e^{-x'} dx' = 1 - e^{-x}$$

- u : número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1
- solução de $u - C(x) = 0$:

$$u - 1 + e^{-x} = 0 \longrightarrow x = -\ln(1 - u)$$

(função quantil da distribuição exponencial)

- assim, dado um conjunto de N números u_i gerados uniformemente entre 0 e 1, calcula-se $x_i = -\ln(1 - u_i) = -\ln \gamma_i$, onde γ_i é também um número aleatório entre 0 e 1
- os $\{x_i\}$ resultantes estarão distribuídos com uma pdf exponencial



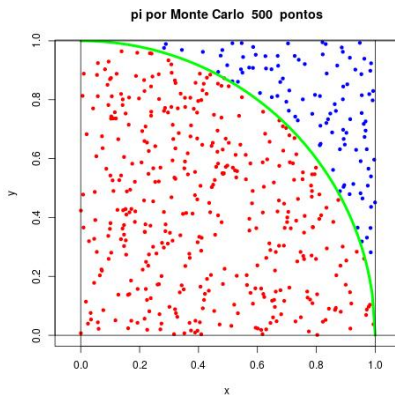
exemplo: integração por Monte Carlo

- MC oferece uma forma simples para se integrar uma função positiva $f(x)$ por simulação numérica:

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad f(x) > 0$$

- exemplo: cálculo de π
 - a área de um quarto de círculo unitário é $\pi/4$
 - sorteamos N pontos uniformemente para x entre 0 e 1 e para y entre 0 e 1
 - podemos estimar π como $\hat{\pi} \simeq 4 \frac{N_{ac}}{N}$, onde N_{ac} é o número de pontos que caem dentro do quarto de círculo

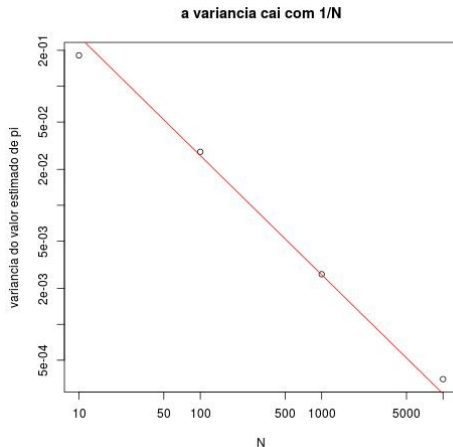
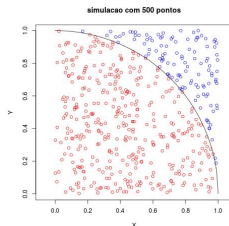
$$f(x) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (0 < x < 1, 0 < y < 1)$$



$$(\hat{\pi} \simeq 3.16)$$

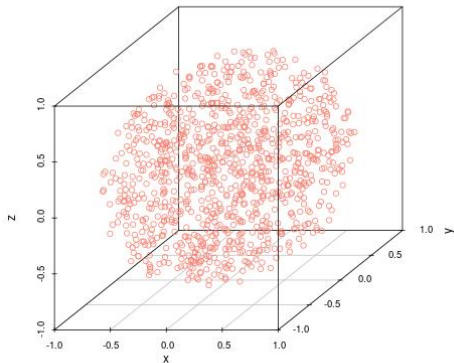
variância nas estimativas por MC

- note que a variância V nos métodos de MC cai com $1/N$
- o desvio padrão σ_s é a raiz quadrada da variância:
 $\sigma_s = V^{1/2}$
- para reduzir σ_s por um fator 2 deve-se multiplicar o número de simulações por um fator 4



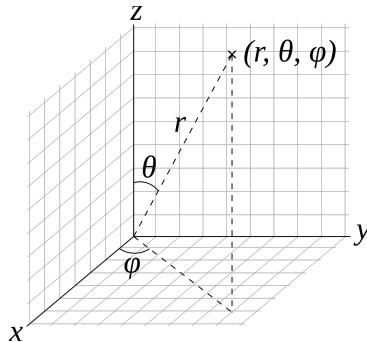
simulações de Monte Carlo

- o método de Monte Carlo é amplamente usado para simular sistemas, processos, etc
- a simulação é feita amostrando-se as variáveis aleatórias do modelo com as distribuições de probabilidade apropriadas
- exemplo: simulação de uma esfera centrada na origem com densidade uniforme de pontos- como simular N coordenadas (x, y, z) com distribuição uniforme?
- regra de ouro: *faça um modelo probabilístico que inclua todas as probabilidades relevantes*



exemplo de simulação: esfera uniforme

- objetivo: simular uma distribuição uniforme de pontos dentro de uma esfera centrada na origem
- parâmetros: N , R
- o melhor é fazer a simulação em coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) e daí obter (x, y, z) :
$$x = r \sin(\theta) \cos(\phi)$$
$$y = r \sin(\theta) \sin(\phi)$$
$$z = r \cos(\theta)$$
com $0 \leq r \leq R$, $0 \leq \theta \leq \pi$ e $0 \leq \phi \leq 2\pi$
- problema: qual é a distribuição da população de r , θ , ϕ ?
- as variáveis (r, θ, ϕ) são independentes:
$$P(r, \theta, \phi) = P(r)P(\theta)P(\phi)$$



exemplo de simulação: esfera uniforme

- densidade média da esfera: $n = 3N/(4\pi R^3)$
- $P(r)dr$: probabilidade de se encontrar um ponto entre os raios r e $r + dr$:

$$P(r)dr \propto ndV \propto n4\pi r^2 dr \rightarrow P(r) \propto r^2$$

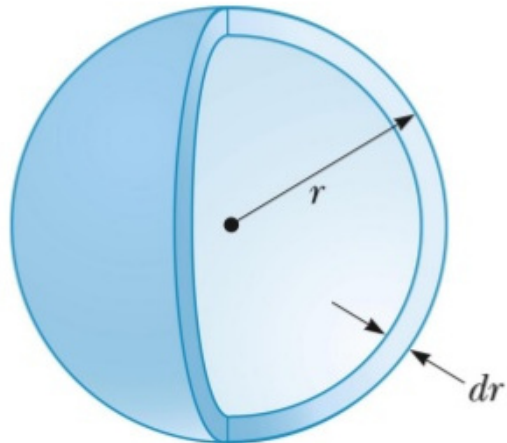
$$\int_0^R P(r)dr = 1 \rightarrow P(r) = \frac{3r^2}{R^3}$$

- função cumulativa:

$$C(r) = \int_0^r P(r')dr' = \left(\frac{r}{R}\right)^3$$

- MC: se u_r é um número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1,

$$C(r) = u_r \rightarrow r = Ru_r^{1/3}$$



exemplo de simulação: esfera uniforme

- elemento de ângulo sólido:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$$

$$0 \leq \theta \leq \pi; \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

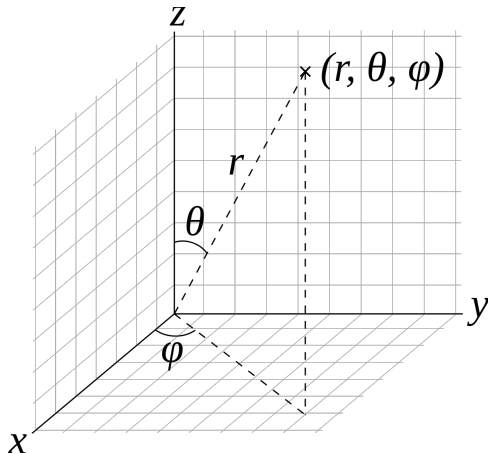
- probabilidade conjunta de θ e ϕ :

$$P(\theta, \phi) d\theta d\phi = d\Omega / 4\pi$$

- marginalizando:

$$P(\theta) = \int_0^{2\pi} P(\theta, \phi) d\phi = \frac{1}{2} \sin\theta$$

$$P(\phi) = \int_0^{\pi} P(\theta, \phi) d\theta = \frac{1}{2\pi}$$



exemplo de simulação: esfera uniforme

- funções cumulativas:

$$C(\phi) = u_\phi = \int_0^\phi \frac{d\phi}{2\pi} = \frac{\phi}{2\pi}$$

$$\longrightarrow \phi = 2\pi u_\phi$$

$$C(\theta) = u_\theta = \int_0^\theta \frac{1}{2} \sin\theta d\theta = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta)$$

$$\longrightarrow \theta = \arccos(1 - 2u_\theta)$$

(u_r, u_θ, u_ϕ) : números aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1

- simulação de um ponto:
gero (u_r, u_θ, u_ϕ) e calculo:

$$r = Ru_r^{1/3}$$

$$\theta = \arccos(1 - 2u_\theta)$$

$$\phi = 2\pi u_\phi$$

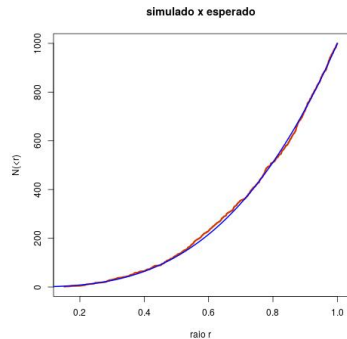
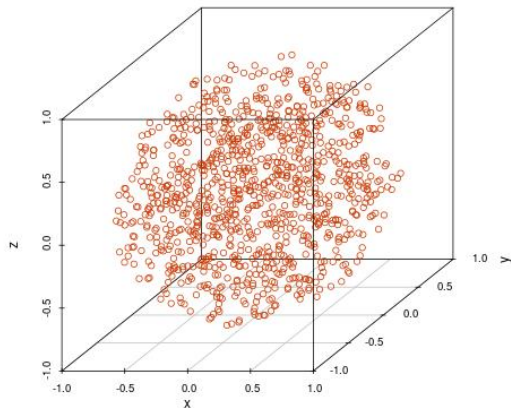
e

$$x = r \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$y = r \sin(\theta) \sin(\phi)$$

$$z = r \cos(\theta)$$

exemplo de simulação: esfera uniforme



número de pontos dentro de um raio r :

$$N(<r) = \frac{4}{3} \pi r^3 n = N \left(\frac{r}{R} \right)^3$$

Markov Chain Monte Carlo



Markov Chain Monte Carlo

- método eficiente para amostrar distribuições de probabilidades complexas!
- em muitos casos não dá para integrar $P(x)$ para amostrar x por MC simples: nesses casos adota-se MCMC
- baseado na mecânica estatística: Metropolis et al. (1953): algoritmo para determinar a equação de estado de um conjunto de partículas em interação dentro de uma caixa

- objetivo do MCMC: amostrar $P(x)$
- x pode ser um vetor
- processo iterativo- o algoritmo gera uma sequência de amostras $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$
- $\mathbf{X}$ forma uma cadeia de Markov: x_{i+1} depende apenas de x_i

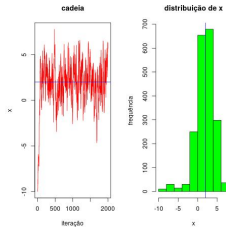
THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS VOLUME 21, NUMBER 6 JUNE, 1953

Equation of State Calculations by Fast Computing Machines

NICHOLAS METROPOLIS, ARIANNA W. ROSENBLUTH, MARSHALL N. ROSENBLUTH, AND AUGUSTA H. TELLER,
Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico

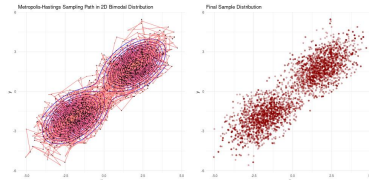
AND

EDWARD TELLER,* *Department of Physics, University of Chicago, Chicago, Illinois*
(Received March 6, 1953)



Markov Chain Monte Carlo

- MCMC produz uma sequência (cadeia) de valores $x_1, x_2, \dots, x_N$, que, para N suficientemente grande, aproxima $P(x)$
- *processo de Markov*: x_{i+1} depende só de x_i
- o *algoritmo de Metropolis-Hastings* (1953) tem duas partes:
 1. dado x_i , a *função de propostas* propõe um novo valor, $\tilde{x}$
por exemplo, $\tilde{x} \sim N(x_i, \sigma_{prop})$
 2. decide-se se o novo ponto é aceito ($x_{i+1} = \tilde{x}$) ou não ($x_{i+1} = x_i$)
- a decisão é probabilística:
se $P(\tilde{x}) \geq P(x_i)$, então $x_{i+1} = \tilde{x}$, caso contrário se aceita $\tilde{x}$ com probabilidade $P(\tilde{x})/P(x_i)$:
 - amostre um número uniformemente distribuído entre 0 e 1, u
 - se $P(\tilde{x})/P(x_i) \geq u$ aceita-se o novo ponto:
 $x_{i+1} = \tilde{x}$
 - se $P(\tilde{x})/P(x_i) < u$, o novo ponto é rejeitado,
 $x_{i+1} = x_i$

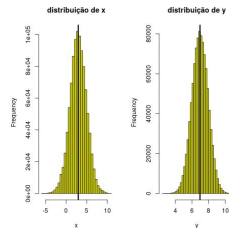
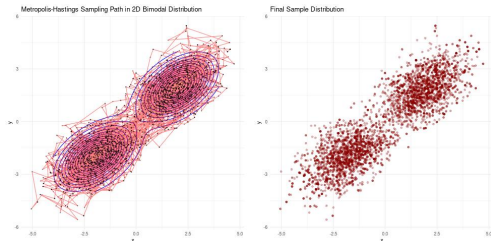
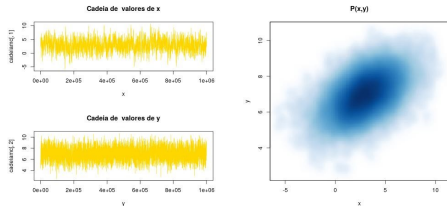


o algoritmo de Metropolis-Hastings

- tendo uma cadeia de amostras $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots\}$, podemos estimar a distribuição de x e estatísticas de interesse:

$$E[x] \simeq \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad E[f(x)] \simeq \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(x_k),$$

onde $f(x)$ é uma função arbitrária de x



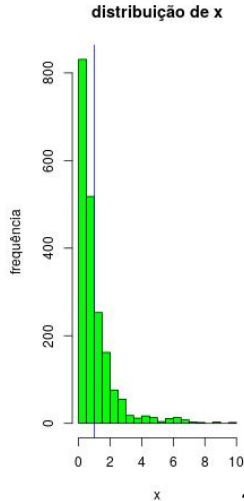
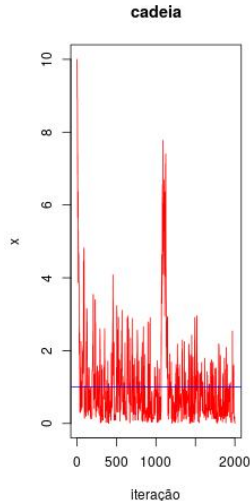
exemplo: amostragem de uma distribuição exponencial

- amostragem de $P(x) = e^{-x}$, $x > 0$
- defino a função de propostas: por exemplo

$$q(x, x_i) \sim N(\mu = x_i, \sigma = 1)$$

note que neste exemplo x deve ser maior que 0!

- inicialização do algoritmo:
defino x_0 e o número de iterações N
- gero a cadeia $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots\}$ com
Metropolis-Hastings
- analiso a convergência
- elimino as cadeias iniciais (*burn-in*)
- analiso os resultados



mcmc: alguns detalhes

- a escala do problema é importante: muitas vezes é melhor amostrar o logaritmo de $P(x)$
- o algoritmo precisa ser inicializado; muitas vezes o ponto inicial não é “típico” e várias iterações são necessárias antes de se poder fazer inferências estatísticas
- essas iterações iniciais são denominadas *burn-in* e devem ser removidas das análises estatísticas
- devido à natureza markoviana do método, amostras próximas são correlacionadas: uma boa amostragem de $P(x)$ pode exigir longas cadeias de amostras
- em alguns casos, onde a função é multi-modal, pode ser necessário se rodar várias cadeias, cada uma começando de um ponto diferente
- até onde se deve rodar uma cadeia? usar *diagnósticos de convergência* e analisar graficamente os resultados